BULLETIN du MUSÉUM NATIONAL d'HISTOIRE NATURELLE

PUBLICATION BIMESTRIELLE

écologie générale

3

N° 147

MAI - JUIN 1973

BULLETIN
du
MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE

57, rue Cuvier, 75005 Paris

Le *Bulletin du Muséum national d'Histoire naturelle*, revue bimestrielle, paraît depuis 1895 et publie des travaux originaux relatifs aux diverses branches de la Science.

Les tomes 1 à 34 (1895-1928), constituant la 1re série, et les tomes 35 à 42 (1929-1970), constituant la 2e série, étaient formés de fascicules regroupant des articles divers.

A partir de 1971, le *Bulletin* 3e série est divisé en six sections (Zoologie — Botanique — Sciences de la Terre — Sciences de l'Homme — Sciences physico-chimiques — Écologie générale) et les articles paraissent, en principe, par fascicules séparés.

S'adresser :

— pour les **échanges,** à la Bibliothèque centrale du Muséum national d'Histoire naturelle, 38, rue Geoffroy-Saint-Hilaire, 75005 Paris (C.C.P., Paris 9062-62) ;

— pour les **abonnements** et les **achats au numéro,** à la Librairie du Muséum 36, rue Geoffroy-Saint-Hilaire, 75005 Paris (C.C.P., Paris 17591-12 — Crédit Lyonnais, agence Y-425) ;

— pour tout ce qui concerne la **rédaction,** au Secrétariat du *Bulletin*, 57, rue Cuvier, 75005 Paris.

Abonnements pour l'année 1973

Abonnement général : France, 360 F ; Étranger, 396 F.

Zoologie : France, 250 F ; Étranger, 275 F.

Sciences de la Terre : France, 60 F ; Étranger, 66 F.

Écologie générale : France, 60 F ; Étranger, 66 F.

Botanique : France, 60 F ; Étranger, 66 F.

Sciences physico-chimiques : France, 15 F ; Étranger, 16 F.

International Standard Serial Number (ISSN) : 0027-4070.

BULLETIN DU MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE
3e série, nº 147, mai-juin 1973, Écologie générale 3

Hydrologie et dynamique dans le Pacifique occidental tropical, en relation avec les mécanismes de fertilisation [1]

par Henri Rotschi et Bruno Wauthy *

Résumé. — Les études entreprises sur la dynamique et l'hydrologie des eaux de la région intertropicale sud de l'océan Pacifique occidental ont montré qu'il existe des mouvements verticaux ayant une action déterminante sur la distribution des sels nutritifs dans la couche euphotique. De tels mouvements intéressent la zone de divergence équatoriale, les zones frontales situées de part et d'autre et, dans les eaux intertropicales, la limite entre les flux ouest et les flux est. De leur fait, les sels nutritifs reminéralisés à partir de la matière organique accumulée sous la couche homogène sont recyclés et assurent, à des zones privilégiées de cette région, une productivité très supérieure à ce qu'elle serait sans eux.

Abstract. — Studies of the dynamics and hydrology of the intertropical zone of the western south Pacific have shown that there are vertical displacements of the water strongly determining the distribution of nutrients in the euphotic layer. Such movements exist in the equatorial divergence zone, in the zone of thermal fronts north and south of the equator and, in the intertropical waters, at the limit between westward and eastward flows. Thus nutrient salts remineralized from the organic matter which accumulates below the homogeneous layer are recycled and give to privileged zones of this region a productivity much higher than what it would be without this circulation.

Introduction

Pendant longtemps, on a considéré que l'upwelling équatorial dans l'océan Pacifique n'était actif et efficace que dans ses parties centrale et orientale ; les causes en étaient le manque d'observations systématiques à l'équateur et l'existence de cartes de répartition de la température moyenne superficielle n'indiquant aucun refroidissement équatorial dans la partie occidentale. Cette opinion se trouvait d'ailleurs étayée par les conditions météorologiques : l'upwelling équatorial est lié à une forte dérive vers l'ouest, entraînée par la composante est des alizés qui sont les plus intenses dans le Pacifique central ; dans le Pacifique occidental, ils sont au contraire faibles et irréguliers et remplacés en hiver boréal par une mousson qui entraîne dans le nord de la Nouvelle-Guinée une dérive en direction de l'est dont les effets peuvent être ressentis assez loin vers l'est.

Cette situation apparaît clairement sur les cartes de distribution de la température de surface de Reid (1969) : le refroidissement équatorial n'atteint pas 180º de mai à octobre

1. Communication présentée aux Journées d'étude « Eaux et pêches outre-mer : inventaire, écologie utilisation », Paris, 23-24 mars 1973, Laboratoire des pêches outre-mer, Muséum national d'histoire naturelle.

* *Centre ORSTOM de Nouméa ; B.P. A5, Nouméa Cédex (Nouvelle-Calédonie).*

(fig. 1) et peut être décelé au mieux jusqu'à 170° E de novembre à avril ; encore peut-il être interprété comme résultant du transport advectif, le long de l'équateur, par le courant équatorial sud, d'eau froide due à l'upwelling du Pacifique central. Ce refroidissement peut, de plus, n'être qu'apparent. Cependant, la combinaison de la circulation thermohaline et de la circulation induite par les vents conduit à des modèles de distribution de la température assez proches de la réalité (Bryan et Cox, 1967). Le refroidissement est en outre accentué par l'extension d'eau chaude vers l'est, à savoir : dans l'hémisphère nord, d'une eau chaude formée en surface dans le Pacifique tropical occidental et transportée par le contre-courant équatorial nord dont le flux est maximum en août (Wyrtki et Kendall, 1967) ; dans l'hémisphère sud, d'une eau chaude à faible salinité, originaire du nord de la mer du Corail (Reid, *ibid.*), et transportée vers l'est en hiver boréal.

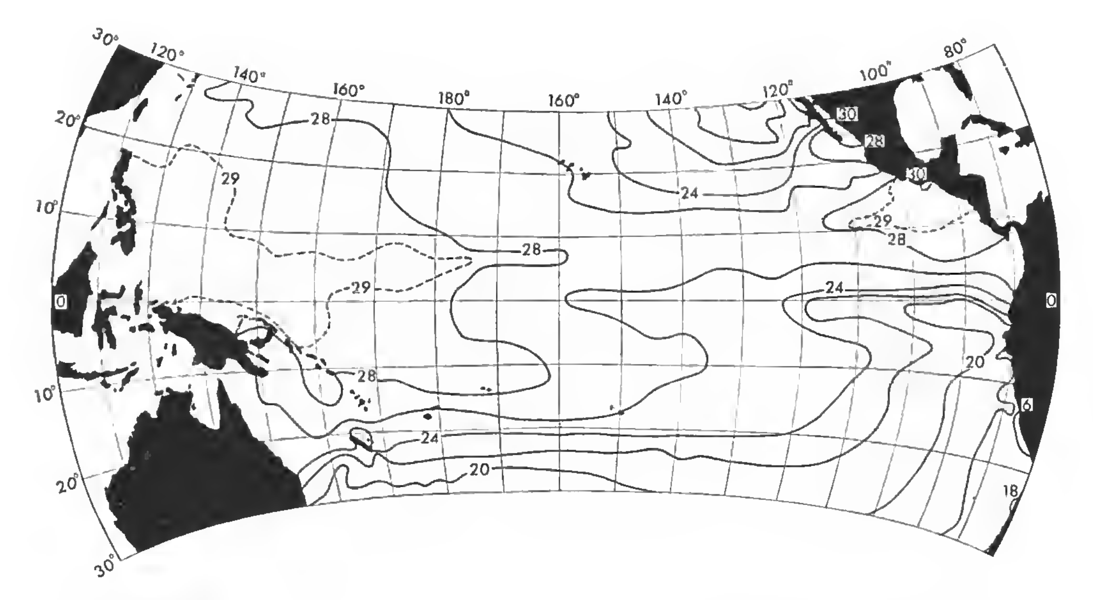


Fig. 1. — Température de surface, de mai à octobre, dans l'océan Pacifique. (D'après Reid, 1969.)

Le caractère peu contrasté de la température superficielle dans le Pacifique équatorial occidental et sa relation avec un upwelling ont été discutés, entre autres, par Austin et Rinkel (1958) qui ont conclu qu'à l'ouest de 180° il n'y avait probablement pas de remontée d'eau froide ; pour ces auteurs, l'absence de divergence équatoriale est due à la faiblesse de la composante est des vents dominants ainsi qu'à leur irrégularité.

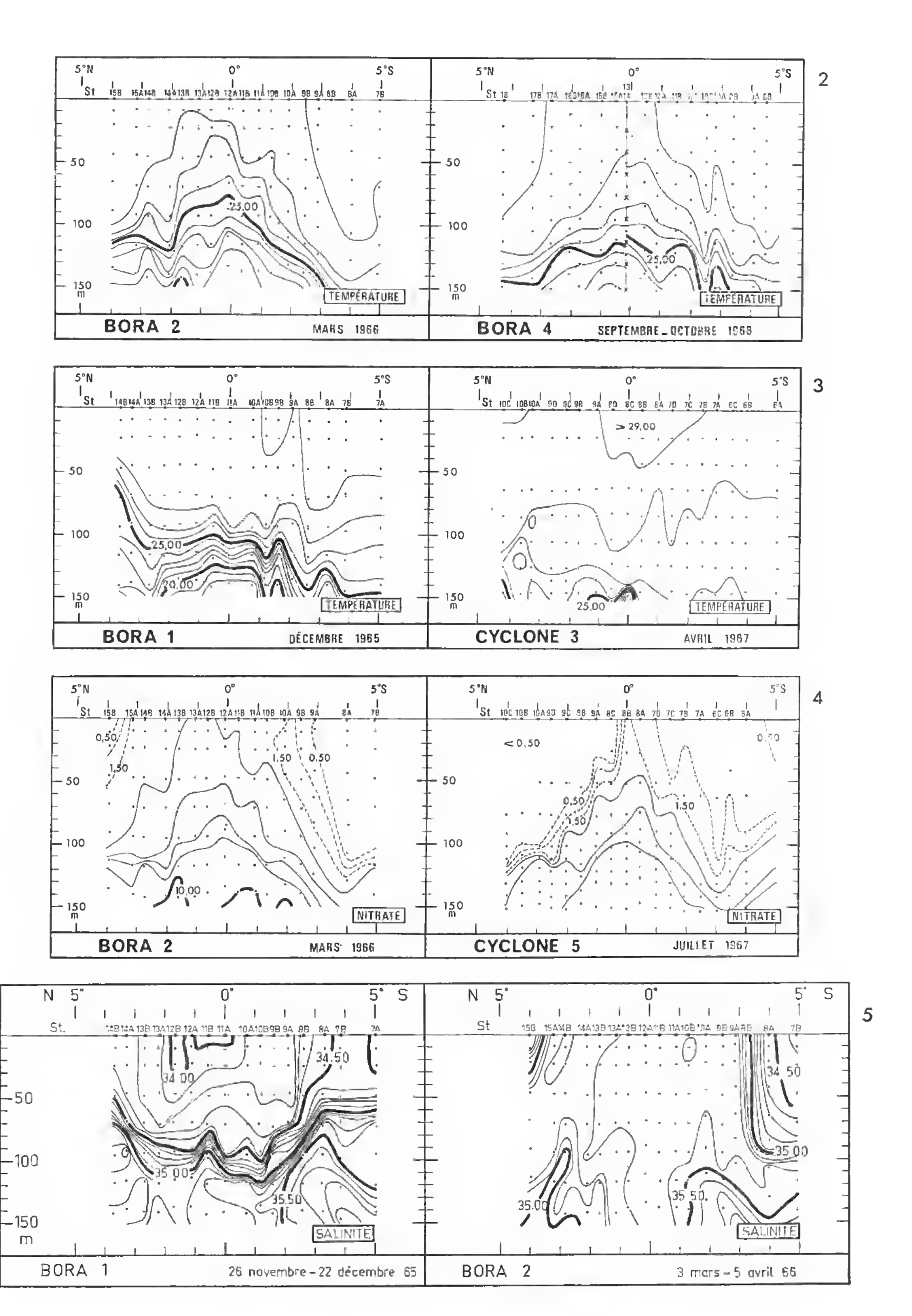
A l'encontre de ces conclusions, les études du Centre ORSTOM de Nouméa, basées sur des croisières systématiques du « Coriolis » à l'équateur, ont établi la réalité de l'upwelling par 170° E ; le long de ce méridien, ces travaux ont également permis la mise en évidence d'une circulation en zone tropicale susceptible d'entretenir un certain enrichissement de la couche superficielle conduisant à une production organique localement accrue.

UPWELLING ÉQUATORIAL À 170° E

Les observations du N.O. « Coriolis » effectuées entre décembre 1965 et mai 1968 ont montré la quasi-permanence du refroidissement équatorial de la couche superficielle à cette longitude. A toutes les croisières sauf deux, on a en effet observé, par vent de secteur est et courant ouest de surface, une remontée des isothermes de la partie supérieure de la thermocline accompagnée d'un refroidissement de l'eau de surface (fig. 2). En septembre-octobre 1966 on a même assisté, à la suite de l'accélération du vent de surface de 4 m/s à 8 m/s, à un renforcement de l'upwelling, ce qui confirme les évaluations antérieures de la force minimale du vent nécessaire au maintien d'une circulation ouest à l'équateur (Roden, 1962 ; Neumann, 1960). Aux deux croisières où le refroidissement n'a pas été trouvé (fig. 3), les conditions en surface étaient particulières : en décembre 1965, le vent et le courant portaient à l'est et, en avril 1967, un fort coup de vent d'ouest dans la semaine précédant la croisière avait entraîné un courant est ; dans ces deux cas, on se trouvait donc en situation de convergence à l'équateur, alors que la situation normale est la divergence.

L'examen d'autres propriétés que la température permet de confirmer et de préciser l'importance de cette remontée des eaux subsuperficielles. C'est ainsi que la distribution verticale des sels nutritifs montre (fig. 4) que, dans tous les cas où il y a refroidissement superficiel, on mesure un enrichissement correspondant de l'eau de surface et que, dans la couche subsuperficielle, la remontée des isophèthes suit exactement celle des isothermes. Cette situation normale d'un enrichissement des eaux équatoriales par rapport aux eaux adjacentes constraste avec la pauvreté uniforme à toute latitude de la couche superficielle trouvée lors des deux croisières où une convergence existait en surface à l'équateur. Une autre caractéristique de l'eau d'upwelling est sa salinité ; en effet, dans le Pacifique occidental, les conditions météorologiques font que l'eau de surface est relativement peu salée. En subsurface par contre, dans l'hémisphère sud, le maximum de salinité de l'eau subtropicale sud, qui a plongé le long de la convergence tropicale vers 20° S, s'avance jusqu'à l'équateur, progressant dans la thermocline. Comme la divergence en surface à l'équateur est alimentée en subsurface par une convergence située à la base de la couche superficielle et empiétant sur le sommet de la thermocline, elle entraîne une eau relativement salée : ainsi la situation normale de divergence (fig. 5, « Bora » 2) montre-t-elle, en surface à l'équateur, de l'eau atteignant 35,30 ‰, contrastant avec celle trouvée au nord et au sud, de salinité inférieure à 34,50 ‰ et qui envahit toute la zone équatoriale en situation de convergence (fig. 5, « Bora » 1).

Il existe donc, en zone équatoriale du Pacifique occidental, des indices hydrologiques nets de mouvements verticaux liés au régime des vents ; par vents persistants du secteur est, une divergence en surface à l'équateur entraîne une remontée d'eau subsuperficielle froide, salée, dense, riche en sels nutritifs et que l'on peut caractériser par les valeurs typiques suivantes : T°C = 27,00°C, S‰ = 35,30‰, Δ st = 490 cl/t, P-PO_4 = 0,50 matg/m³, N-NO_3 = 3,00 matg/m³. Cet upwelling cesse par vent du secteur ouest et une eau chaude, peu salée, légère et appauvrie en sels nutritifs, envahit alors la couche superficielle. Ce



2
BORA 2
MARS 1966
TEMPÉRATURE
25,00
BORA 4
SEPTEMBRE _ OCTOBRE 1966
3
BORA 1
DÉCEMBRE 1965
25,00
20,00
CYCLONE 3
AVRIL 1967
> 29,00
4
BORA 2
MARS 1966
NITRATE
10,00
CYCLONE 5
JUILLET 1967
< 0,50
5
BORA 1
26 novembre – 22 décembre 65
SALINITE
34,00
34,50
35,00
35,50
BORA 2
3 mars – 5 avril 66

qu'il advient de l'eau de l'upwelling, précédemment en surface à l'équateur, a été précisé par des croisières mettant l'accent sur des mesures directes de courant en zone équatoriale et qui ont permis de dégager un schéma de circulation méridienne expliquant de façon satisfaisante les distributions observées.

CIRCULATION MÉRIDIENNE À 170° E

Les mesures confirment l'existence d'une divergence en surface à l'équateur par vent de secteur est et révèlent la présence, au nord et au sud, de zones de convergence parfois traduites par des fronts thermiques. C'est ainsi qu'à la croisière « Cyclone » 2 (mars 1967) la répartition verticale de la température (fig. 6 B) montre, en zone équatoriale, une remou-

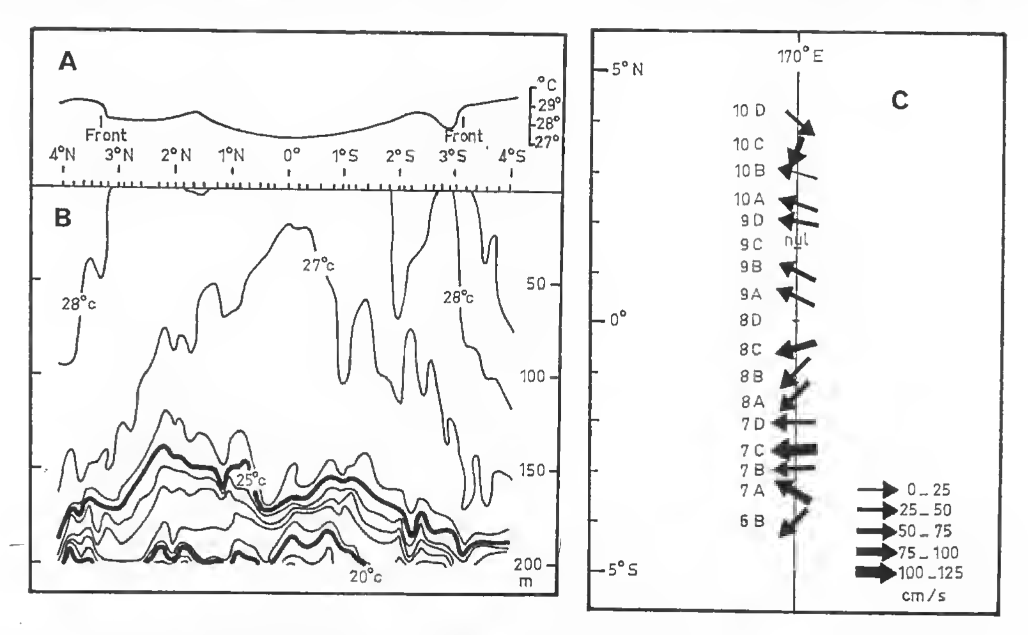


Fig. 6. — A. Variation en latitude, en mars 1967, de la température de surface en zone équatoriale, en période d'upwelling marqué.
B. Répartition de la température dans un plan méridien au cours de la même croisière.
C. Courants mesurés à 5 mètres sous la surface, au cours de la même croisière.
(D'après Rotschi *et al.*, 1968.)

Fig. 2 à 5. — 2, Répartition de la température dans un plan méridien à l'équateur, à 170° E, lorsque le courant de surface porte à l'ouest. Espacement des isothermes : 1° C. (D'après Rotschi, 1968.)
3. Répartition de la température dans un plan méridien à l'équateur, à 170° E, lorsque le courant de surface porte à l'est. Espacement des isothermes : 1° C. (D'après Rotschi, 1969.)
4, Répartition du nitrate dans un plan méridien à l'équateur, à 170° E, lorsque le courant de surface porte à l'ouest. Espacement des isolignes : 2 matg/m³. (D'après Rotschi, 1968.)
5, Répartition de la salinité dans un plan méridien à l'équateur, à 170° E, lorsque le courant de surface porte à l'est (« Bora » 1) et lorsqu'il porte à l'ouest (« Bora » 2). Espacement des isohalines : 0,10 ‰.

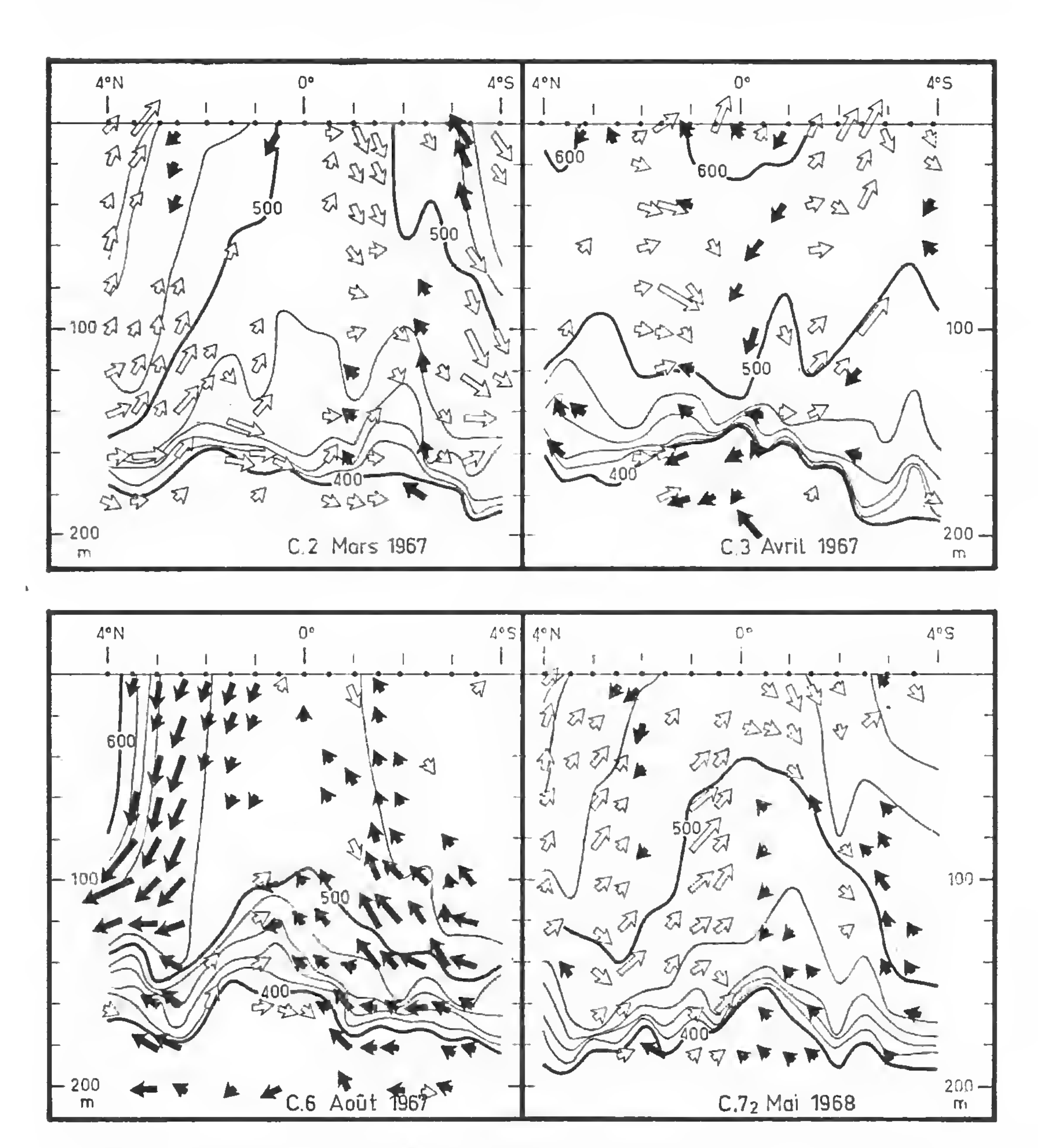


FIG. 7. — Répartition, dans un plan méridien à l'équateur, à 170° E, de la composante nord-sud, supérieure à 10 cm/s, des courants. Dans l'hypothèse d'une circulation isentropique, les vecteurs ont été tracés parallèles aux isanostères. Le vecteur le plus long correspond à une intensité de 60 cm/sec. En noir : courant portant au nord, en blanc : courant portant au sud. (D'après OUDOT *et al.*, 1969.)

tée des isothermes ; en surface (fig. 6 A), il y a un net refroidissement équatorial associé à deux fronts thermiques à 3° N et 3° S. Les mesures de courants à 5 m (fig. 6 C) révèlent une divergence à l'équateur et deux convergences au nord et au sud, au niveau des fronts. Bien qu'une situation aussi claire soit relativement rare à 170° E, la plupart des croisières ont fourni divers indices hydrologiques et dynamiques de convergence, tant en surface, à quelques degrés au nord et au sud (où l'eau remontée à l'équateur peut donc être évacuée latéralement), qu'en subsurface, au sommet de la thermocline, où il y a alimentation de l'upwelling par l'eau adjacente. Ces indices sont essentiellement les composantes nord-sud des courants mesurés, les anomalies de répartition verticale de la salinité, et les inversions stables de la température.

Dans l'hypothèse d'une circulation quasi isentropique, la représentation (fig. 7) de la composante nord-sud du courant dans laquelle les vecteurs nord-sud, d'une intensité supérieure à 10 cm/s, sont figurés parallèlement aux isanostères, illustre à des degrés divers,

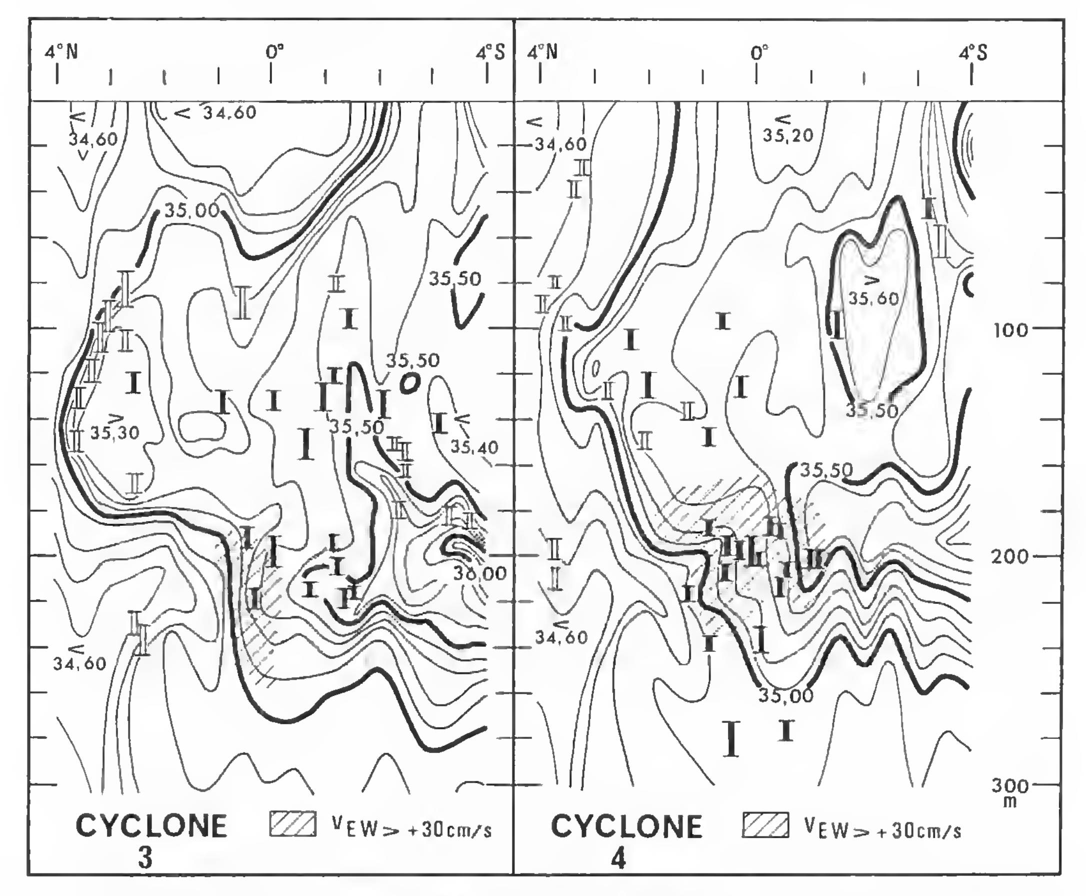


Fig. 8. — Section verticale de salinité par 170° E. On a porté également les inversions de température constatées ; la longueur du segment représente l'épaisseur de la couche d'inversion (en blanc : inversions liées à un fort gradient vertical de salinité). « Cyclone » 3 : mars 1967 ; « Cyclone » 4 : avril 1967.

pour les croisières « Cyclone » 2, 6 et 7-2 effectuées en situation d'upwelling, la divergence équatoriale et les convergences latérales en surface, ainsi que la convergence équatoriale au sommet de la thermocline. La croisière « Cyclone » 3, effectuée alors que le courant de surface portait à l'est, révèle au contraire une convergence équatoriale en surface. Les croisières « Cyclone » 2 et 6 indiquent, en outre, que la circulation dans un plan méridien est souvent asymétrique par rapport à l'équateur : par vent de nord-est, comme au cours de la croisière « Cyclone » 2, il y a, en effet, prépondérance du flux vers le sud ; en revanche, par vent de sud-est, cas de la croisière « Cyclone » 6, c'est le flux vers le nord qui l'emporte. Dans les deux cas, l'eau « upwellée » en zone équatoriale s'évacue en plongeant latéralement à la convergence ; s'insinuant dans la partie supérieure de la thermocline, elle s'éloigne ensuite de l'équateur.

Pour ce qui est des inversions de température qui ont été reportées sur la section de salinité de la figure 8, certaines d'entre elles, vers 3-4° N, sont associées à un fort gradient vertical de salinité ; elles coïncident également avec la surface de convergence le long de laquelle l'eau salée « upwellée » en zone équatoriale plonge sous l'eau superficielle du contre-courant équatorial nord après avoir été plus ou moins réchauffée en surface au cours de son déplacement vers le nord. Cette eau est reprise ensuite par la circulation zonale et apparaît alors sur les coupes méridiennes comme une petite masse salée, isolée et en équilibre de densité avec l'eau du nord qui la surplombe ; cette dernière étant moins salée est par conséquent plus froide, d'où apparition d'une inversion thermique stable. D'autres inversions situées soit au sommet de la thermocline à l'équateur, soit au niveau du maximum de vitesse du courant de Cromwell, sont liées à des gradients horizontaux de salinité ; elles traduisent le réarrangement vertical, la densité croissant vers le bas, d'un système de lamelles où la température et la salinité diffèrent (Stommel et Fedorov, 1967). Ces lamelles sont constituées d'eaux bien distinctes, originaires soit de l'hémisphère sud (eau chaude et salée du maximum subtropical du Pacifique sud), soit de l'hémisphère nord (eau froide et moins salée du contre-courant équatorial nord). De telles inversions sont donc associées à un mouvement convergent vers l'équateur des eaux subsuperficielles.

Par ailleurs, il existe, au sud de l'équateur et à une profondeur voisine de 100 m, des noyaux salés (salinité supérieure à 35,50 ‰ à 4° S et 80 m, au cours de la croisière « Cyclone » 3, salinité supérieure à 35,60 ‰ à 2° S et 100 m au cours de la croisière « Cyclone » 4 ; figure 8) ; on les trouve à la latitude de la convergence sud. Du fait de leur salinité élevée, ils ne peuvent dériver que de l'eau subtropicale du Pacifique sud. Le diagramme T-S vertical à la latitude de ces noyaux indique que l'eau qui les compose est beaucoup plus chaude que celle de même salinité qui découlerait d'un mélange de l'eau d'origine avec les eaux de surface ; elle ne peut donc s'être formée que par réchauffement en surface d'une eau « upwellée » qui, se déplaçant ensuite en direction des pôles, rencontre au niveau d'un front une eau plus légère sous laquelle elle plonge.

Les données courantométriques et hydrologiques conduisent donc à un schéma nouveau de la circulation méridienne moyenne en zone équatoriale, par vent d'est avec en surface un courant ouest (fig. 9). Ce schéma, symétrique par rapport à l'équateur, est compatible avec différents modèles proposés antérieurement (Cromwell, 1953 ; Fofonoff et Montgomery, 1955), tout au moins en ce qui concerne les 200 premiers mètres. Cette circulation, qui amène en surface, à l'équateur, un enrichissement quasi permanent, conditionne de façon très nette la production primaire à 170° E.

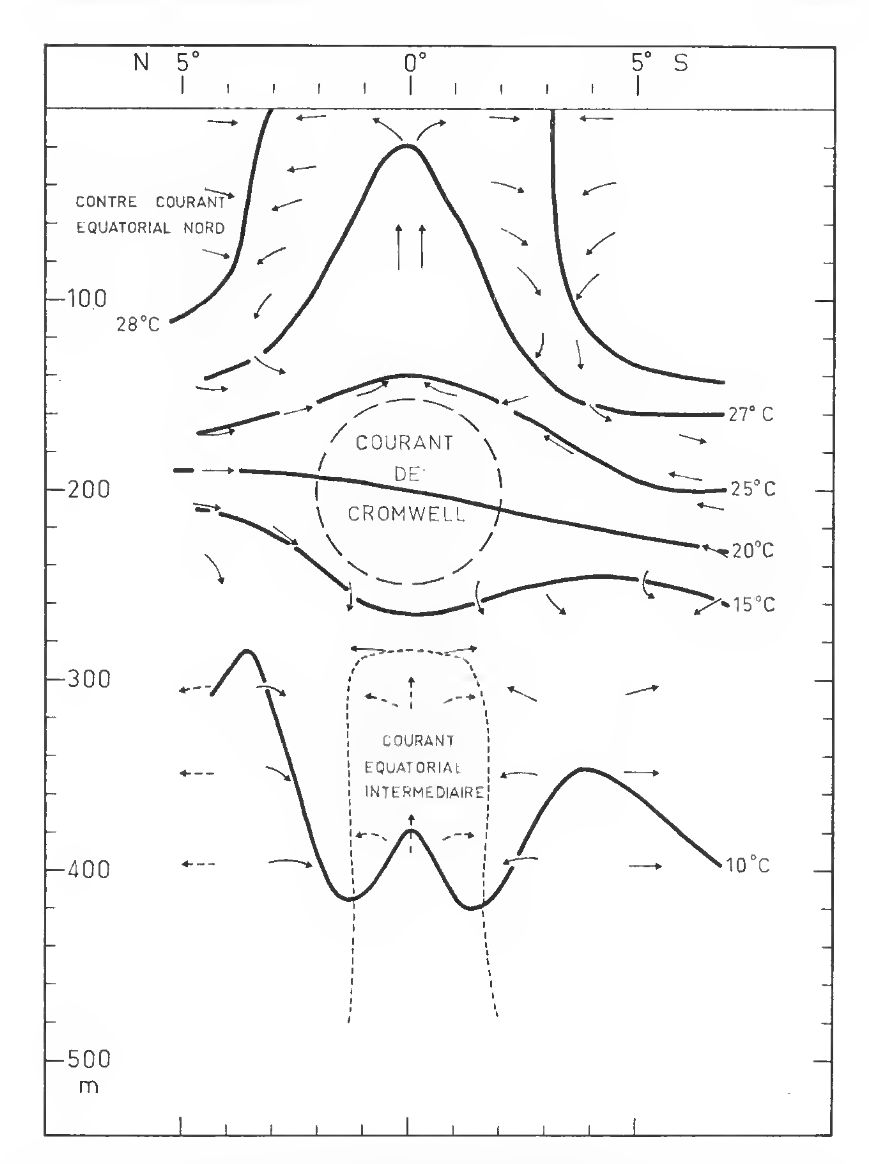


Fig. 9. — Schéma de circulation dans un plan méridien à l'équateur en mars 1967. (D'après Rotschi et Colin, *s.pr.*)

PRODUCTION PRIMAIRE À 170° E

Elle a été évaluée par mesure d'une part de la chlorophylle *a*, d'autre part de la production de carbone organique. La première (fig. 10), qui donne une estimation de la biomasse de phytoplancton, a été mesurée spectro-photométriquement à partir de grands

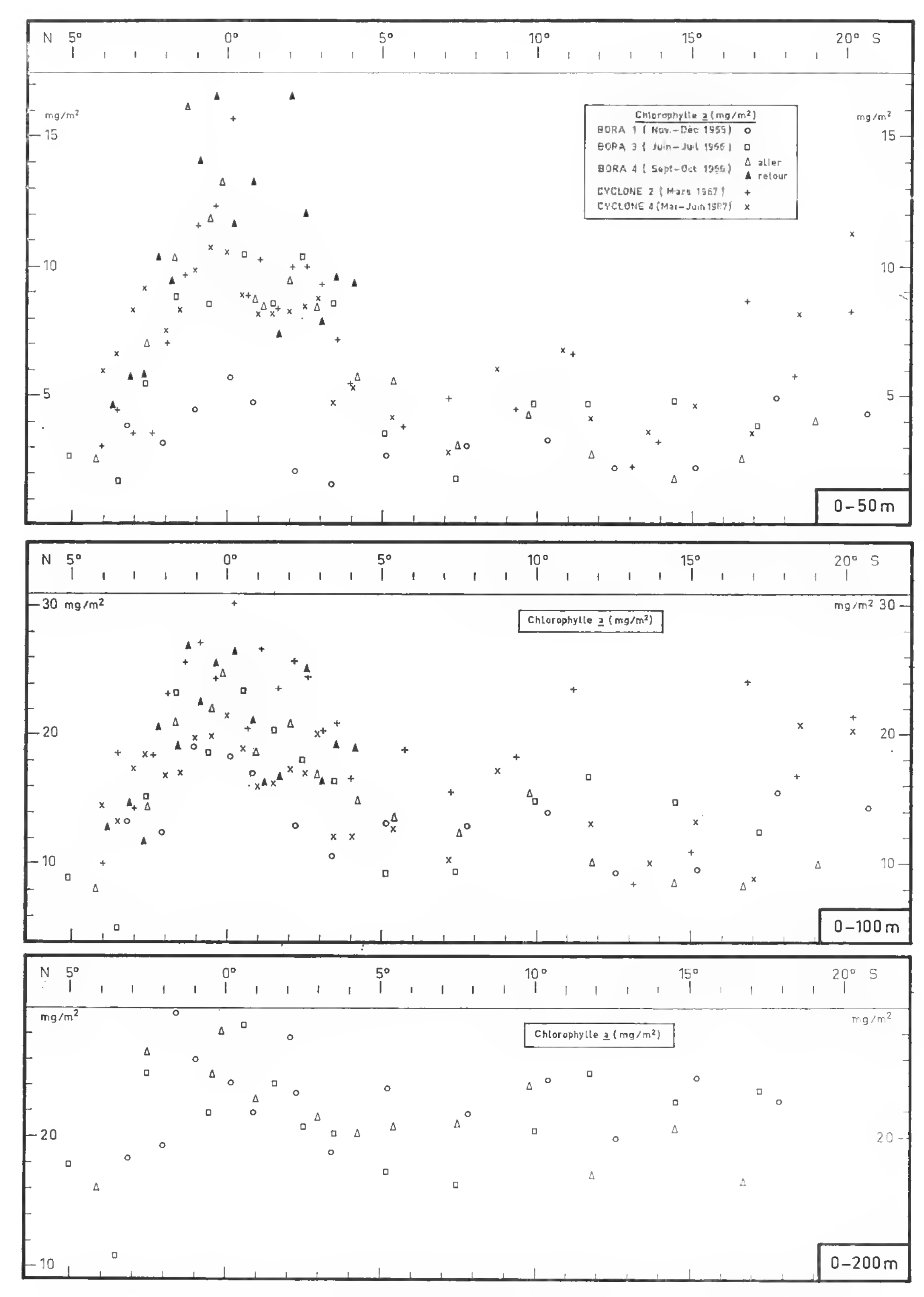


Fig. 10. — Répartition en latitude de la chlorophylle *a*, le long du méridien 170° E, dans la couche 0-50 m. (D'après Rotschi *et al.*, 1973.)

volumes d'eau filtrée (10-20 litres) avec des cuves à long trajet optique (10 cm) et de faible capacité (5 ml), ce qui améliore considérablement la sensibilité de la méthode applicable alors à des eaux oligotrophes. La seconde (fig. 11) est une mesure de la fixation de CO_2 ; les échantillons marqués au ^{14}C ont été incubés *in situ*, ce qui donne une approximation aussi bonne que possible de la production réelle dans la couche euphotique (Le Bourhis et Wauthy, 1969).

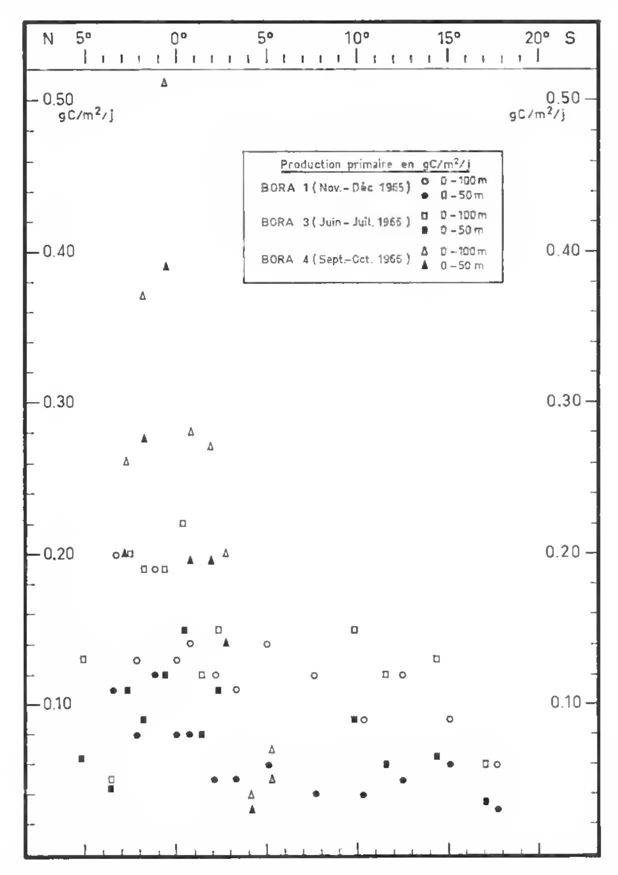


Fig. 11. — Répartition en latitude de la production primaire mesurée par la méthode du ^{14}C, le long du méridien 170° E. (D'après Rotschi *et al.*, 1973.)

Les résultats montrent la réponse du phytoplancton à l'enrichissement équatorial : la biomasse à l'équateur, dans la couche 0-50 m, est 2 à 3 fois plus forte que plus au sud, et la production primaire moyenne correspondante de 0,30 gC/m²/jour est comparable à celle des zones tempérées riches. On remarque également que la zone de production équatoriale privilégiée est très étroite, ne dépassant pas 3° à 4° au nord et au sud ; elle correspond très exactement à la zone d'action de l'enrichissement équatorial en sels nutritifs, limitée par les convergences nord et sud mises en évidence par les études d'hydrologie et de courantométrie.

La réponse du phytoplancton suit de très près l'intensité de l'upwelling. Les résultats contrastés de « Bora » 1 en décembre 1965 où la biomasse était faible et la production médiocre et de « Bora » 4 en octobre 1966 où elles étaient toutes deux élevées, illustrent de façon nette l'opposition déjà signalée entre deux situations à l'équateur, l'une de convergence, l'autre de divergence (fig. 2 et 3). Mais la disparition, d'une situation à l'autre, de l'essentiel de la biomasse phytale de la couche superficielle associée à l'eau « upwellée » pose le problème du devenir de la matière organique produite à l'équateur.

MINÉRALISATION À 170° E

Toutes les croisières du N.O. « Coriolis » ont indiqué la présence d'une couche d'accumulation de nitrite en subsurface en zone équatoriale, où la concentration dépasse 2 matg/m^3. Hisard et Piton (1969) en ont donné une description détaillée, établissant qu'à l'équateur le nitrite se trouve dans le gradient de densité et que sa concentration en surface suit l'intensité de l'upwelling au même titre qu'un autre sel nutritif ; ils ont montré que la couche a un maximum d'épaisseur vers 5° S où elle s'étale entre deux gradients de densité. Le gradient supérieur qui la sépare de la couche de surface est dû surtout à la répartition verticale de la température, tandis que le gradient inférieur est dû à la présence du maximum subtropical de salinité du Pacifique sud ; ils ont montré enfin que le nitrite est lié à une utilisation de l'oxygène (U.A.O.) positive. Oudot *et al.* (1969) ont montré qu'à l'équateur, le maximum de nitrite est associé à un anomalie thermostérique (Δst) précise, différente au nord et au sud, donc apparemment liée à des eaux déterminées circulant de façon isentropique.

La croisière « Éponite » entreprise pour étudier tout spécialement cette accumulation remarquable (Hisard *et al.*, 1971) a permis d'en préciser certains traits et d'avancer dans l'interprétation de sa formation (Oudot *et al.*, 1972 ; Hisard *et al.*, 1972). En particulier, il a été montré que les caractéristiques T°C et S‰ de l'eau du maximum de nitrite lui conféraient l'anomalie de densité de l'eau « upwellée » à l'équateur et ayant replongé, et que la distribution verticale du nitrite était conforme à celle que l'on obtiendrait par diffusion ou mélange turbulent vertical à partir d'une « couche-source » de nitrite intercalée entre deux gradients de densité dans une structure stratifiée (fig. 12). En ce qui concerne le mode de formation du nitrite, il semble peu probable que ce dernier soit dû à la réduction du nitrate par le phytoplancton (Vaccaro et Ryther, 1960) car le maximum de chlorophylle *a* était nettement au-dessus, dans le gradient supérieur de densité, à la base de la couche homogène. Par contre, deux arguments plaident en faveur d'une minéralisation par oxydation de la matière organique : d'une part, l'association du nitrite et des fortes valeurs de phaeo-pigments dans une eau à UAO positive ; d'autre part, l'existence d'une couche où les sels nutritifs sont en excès par rapport aux propriétés conservatives et qui correspond au maximum de nitrate, supérieur à 8,5 matg/m^3, à 8° S.

Quant à la matière organique, il est peu vraisemblable qu'elle puisse tomber de la couche euphotique, car dans ce cas les particules s'accumuleraient à la base de la couche homogène, au-dessus du gradient de densité et non au-dessous comme le nitrite ; par ail-

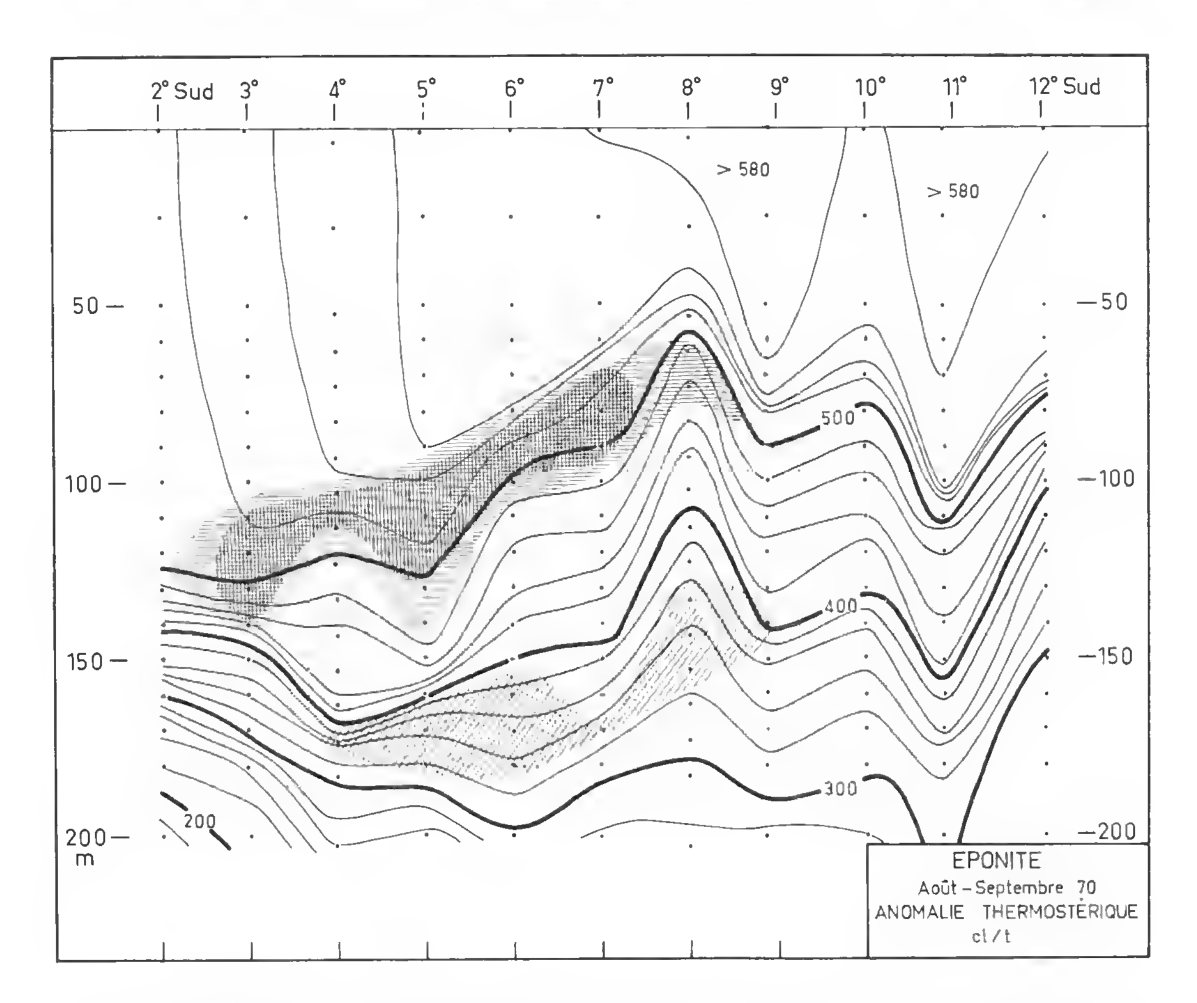


FIG. 12. — Répartition du nitrite en septembre 1970, sur fond de densité, dans un plan méridien à 170° E. En grisé clair : concentrations inférieures à 1 matg/m³ ; en grisé foncé : concentrations supérieures à 1 matg/m³. En hachuré : salinité supérieure à 36‰. Les isanostères sont espacées de 20 cl/t. (D'après HISARD *et al.*, 1972.)

leurs, la production au sud de l'équateur est faible. Par contre, la circulation méridienne suggérée précédemment fournit le mécanisme nécessaire pour relier la disparition périodique de matière organique produite à l'équateur à l'accumulation au sud, en subsurface, du nitrite, forme intermédiaire dans la minéralisation de l'azote. Le nitrite pourrait ainsi être un excellent traceur d'une circulation méridienne capable de transférer une partie de la richesse organique équatoriale, vers le sud, par transport dans la thermocline au-dessus du « plancher » constitué en zone tropicale occidentale par la couche relativement pauvre du maximum de salinité.

CIRCULATION INTERTROPICALE

A chacune des dix croisières du N.O. « Coriolis » le long du méridien 170° E, on a noté l'existence d'une circulation tropicale géostrophique assez complexe impliquant, outre le courant équatorial sud, la permanence de deux contre-courants : le contre-courant équatorial sud dont le noyau est situé vers 10° S, et le contre-courant tropical sud localisé au sud de 15° S et dont la limite sud n'a pas pu être précisée, les observations s'arrêtant à 20° S. Ces courants, qui ont été étudiés par Jarrige (1968) et Merle *et al.* (1969), transportent des eaux qui leur sont spécifiques ; ils sont géostrophiques, associés à une inversion de pente des isothermes supérieures de la thermocline, et leur présence a été confirmée par des mesures directes de courant.

Dans l'hypothèse d'une circulation zonale stationnaire, la juxtaposition de flux de sens opposés crée, dans l'hémisphère sud, une convergence à la limite nord et une divergence à la limite sud d'un contre-courant portant à l'est et inclus dans une circulation générale

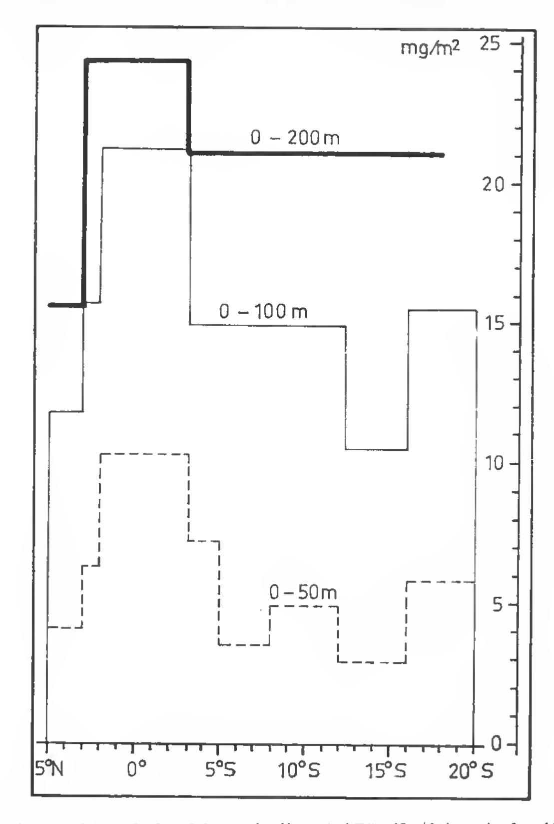


Fig. 13. — Distribution schématique de la chlorophylle *a* à 170° E. (D'après Le Bourhis et Wauthy, 1969.)

vers l'ouest. Pour ce qui est du contre-courant équatorial sud, la divergence sera localisée vers 10° S et la convergence entre 5° S et 10° S ; pour le contre-courant tropical sud, la convergence sera vers 15° S ; correspondant à ces zones de divergence et de convergence, on trouve en surface des biomasses végétales relativement riches ou pauvres, comme le confirment les résultats cumulés des différentes croisières (fig. 13) ; la topographie de la surface de discontinuité associée à cette alternance des courants et contre-courants, amenant les fortes concentrations de sels nutritifs plus ou moins près de la surface, rend compte de ces différences d'enrichissements de la couche euphotique par diffusion ou mélange dû aux vents.

Conclusion

Ainsi, le phénomène d'upwelling étudié par Austin et Rinkel (1958) et les mécanismes corrélatifs d'enrichissement de la couche superficielle dans le Pacifique central, à l'est de 180°, se rencontrent également dans la partie occidentale par 170° E.

Malgré leur irrégularité, les vents, en général de secteur est, provoquent à l'équateur un upwelling capable d'entretenir à longueur d'année une production moyenne nettement plus forte qu'au nord et au sud. Cette production édifiée par à-coups peut être stockée sous forme de matière organique particulaire associée à l'eau de l'upwelling, qui diverge en surface de part et d'autre de l'équateur, plonge ensuite en des convergences actives de part et d'autre, s'insinue dans la thermocline et s'accumule au nord et au sud, en subsurface : cette matière organique, par l'intermédiaire des Bactéries et des Flagellés, pourrait servir de nourriture à des « filter-feeders ». Il y a là un mécanisme capable d'assurer une utilisation optimale continue d'une production discontinue à l'équateur. La phase ultime de l'utilisation de cette matière organique est, bien entendu, sa minéralisation, dont l'étape intermédiaire du nitrite révèle la localisation et l'extension au nord et au sud.

Ces sels nutritifs contribuent en zone tropicale à des enrichissements localisés, dus surtout à des mécanismes liés au système des courants zonaux ; mais pour l'essentiel, ils sont repris par la circulation méridienne qui les ramène à l'équateur où se place l'enrichissement maximal. Le cycle « production — utilisation — minéralisation — enrichissement » se déroulerait donc entièrement dans une couche superficielle de 150 mètres, isolée des eaux profondes intermédiaires par le maximum de salinité subsuperficiel. A l'équateur, cependant, les cisaillements aux interfaces entre le courant de Cromwell coulant vers l'est d'une part et les courants ouest, intermédiaire profond et équatorial sud superficiel d'autre part, pourraient provoquer des mélanges entre eux ; le courant de Cromwell apparaîtrait alors non seulement comme un courant de compensation dynamique, mais aussi comme un courant ramenant vers l'est des sels nutritifs utilisés lors d'une circulation complexe, laquelle se traduit pour la couche superficielle considérée par un transport global vers l'ouest (Colin *et al.*, 1971).

RÉFÉRENCES

AUSTIN, T. S., et M. O. RINKEL, 1958. — Variations in upwelling in the equatorial Pacific. *Proc. Ninth Pac. Sci. Congr.*, 1957, **16** : 67-71.

BRYAN, K., et D. COX, 1967. — A numerical investigation of the oceanic general circulation. *Tellus*, **19** : 54-80.

COLIN, C., C. HENIN, P. HISARD et C. OUDOT, 1971. — Le courant de Cromwell dans le Pacifique central en février 1970. *Cah. ORSTOM, sér. Océanogr.*, **9** (2) : 167-186.

CROMWELL, T., 1953. — Circulation in a meridional plane in the central equatorial Pacific. *J. mar. Res.*, **12** (2) : 196-213.

FOFONOFF, N. P., et R. B. MONTGOMERY, 1955. — The equatorial undercurrent in the light of the vorticity equation. *Tellus*, **7** : 518-521.

HISARD, P., et B. PITON, 1969. — La distribution du nitrite dans le système des courants équatoriaux de l'océan Pacifique à 170° E. *J. Cons. perm. int. Explor. Mer*, **32** (3) : 303-317.

HISARD, P., B. WAUTHY et J. PAGES, 1971. — The organization of the last multidisciplinary cruise of N.O. Coriolis. Int. Mar. Sci. Symp., August 1971, Sydney, Australia. Institute of Marine Sciences. Univ. New South Wales : 58-62.

HISARD, P., C. COLIN, R. DESROSIÈRES, J. GARBE, J. A. GUÉRÉDRAT, A. LE CORVAISIER, C. OUDOT, J. PAGES, P. RUAL, et B. WAUTHY, 1972. — Rapport scientifique de la croisière « Eponite » du N.O. « Coriolis ». ORSTOM, Centre de Nouméa, Rapp. **48** : 103 p. (multigr.).

JARRIGE, F., 1968. — On the eastward flow of water in the western Pacific south of the equator. *J. mar. Res.*, **26** (3) : 286-289.

LE BOURHIS, J., et B. WAUTHY, 1969. — Quelques aspects de la distribution de la production primaire le long du méridien 170° E, entre 20° S et 5° N. *Cah. ORSTOM., sér. Océanogr.*, **7** (4) : 83-93.

MERLE, J., H. ROTSCHI et B. VOITURIEZ, 1969. — Zonal circulation in the tropical western south Pacific at 170° E. Perspectives in fisheries Oceanography, Jap. Soc. Fish. Oceanogr., Special Number : 91-98.

NEUMANN, G., 1960. — Evidence for an equatorial undercurrent in the Atlantic Ocean. *Deep-Sea Res.*, **6** (4) : 328-335.

OUDOT, C., P. HISARD et B. VOITURIEZ, 1969. — Nitrite et circulation méridienne à l'équateur, dans l'océan Pacifique occidental. *Cah. ORSTOM, sér. Océanogr.*, **7** (4) : 67-82.

OUDOT, C., P. RUAL et B. WAUTHY, 1972. — Mineralisation south of the equator in relation to equatorial fertility. Int. Symp. Oceanogr. South Pac. February 1972, Wellington, New Zealand, Abstracts : 27-29.

REID, J. L., 1969. — Sea-surface temperature, salinity and density of the Pacific ocean in summer and winter. *Deep-Sea Res.*, suppl. to vol. **16** : 215-224.

RODEN, G. I., 1962. — Oceanographical aspects of the eastern equatorial Pacific. *Geofisica Internacional*, **2** (4) : 77-91.

ROTSCHI, H., 1968. — Remontée d'eau froide et convergence à l'équateur dans le Pacifique occidental. *C. r. Acad. Sci. Paris*, **267** : 1459-1462.

ROTSCHI, H., et C. COLIN. — Sur la circulation Nord-Sud à l'équateur dans l'Océan Pacifique Occidental. *C. r. Acad. Sci., Paris* (*sous presse*).

ROTSCHI, H., P. HISARD et P. RUAL, 1968. — Observation de deux fronts thermiques dans le Pacifique équatorial occidental. *C. r. Acad. Sci. Paris*, **266** : 1465-1468.

ROTSCHI, H., P. HISARD et F. JARRIGE, 1972. — Les eaux du Pacifique occidental à 170° E entre 20° S et 4° N. Coupes et cartes dressées par les Océanographes du Centre O.R.S.T.O.M. de Nouméa. *Trav. Docum. ORSTOM*, **19**, (1972) : 113 p.

Stommel, H., et K. N. Fedorov, 1967. — Small scale structure in temperature and salinity near Timor and Mindanao. *Tellus*, **19** : 306-325.

Vaccaro, R. F., et J. H. Ryther, 1960. — Marine phytoplankton and the distribution of nitrite in the sea. *J. Cons. perm. int. Explor. Mer*, **25** : 260-271.

Wyrtki, K., et R. Kendall, 1967. — Transports of the equatorial countercurrent. *J. geophys. Res.*, **72** (8) : 2073-2076.

Manuscrit déposé le 5 avril 1973.

Bull. Mus. natn. Hist. nat., Paris, 3e sér., no 147, mai-juin 1973, Écologie générale 3 : 65-81.

Achevé d'imprimer le 31 janvier 1974.

IMPRIMERIE NATIONALE

3 564 003 5

Recommandations aux auteurs

Les articles à publier doivent être adressés directement au Secrétariat du *Bulletin du Muséum national d'Histoire naturelle*, 57, rue Cuvier, 75005 Paris. Ils seront accompagnés d'un résumé en une ou plusieurs langues. L'adresse du Laboratoire dans lequel le travail a été effectué figurera sur la première page, en note infrapaginale.

Le *texte* doit être dactylographié à double interligne, avec une marge suffisante, recto seulement. Pas de mots en majuscules, pas de soulignages (à l'exception des noms de genres et d'espèces soulignés d'un trait).

Il convient de numéroter les *tableaux* et de leur donner un titre ; les tableaux compliqués devront être préparés de façon à pouvoir être clichés comme une figure.

Les *références bibliographiques* apparaîtront selon les modèles suivants :

Bauchot, M.-L., J. Daget, J.-C. Hureau et Th. Monod, 1970. — Le problème des « auteurs secondaires » en taxionomie. *Bull. Mus. Hist. nat., Paris*, 2e sér., **42** (2) : 301-304.

Tinbergen, N., 1952. — The study of instinct. Oxford, Clarendon Press, 228 p.

Les *dessins* et *cartes* doivent être faits sur bristol blanc ou calque, à l'encre de chine. Envoyer les originaux. Les *photographies* seront le plus nettes possible, sur papier brillant, et normalement contrastées. L'emplacement des figures sera indiqué dans la marge et les légendes seront regroupées à la fin du texte, sur un feuillet séparé.

Un auteur ne pourra publier plus de 100 pages imprimées par an dans le *Bulletin*, en une ou plusieurs fois.

Une seule épreuve sera envoyée à l'auteur qui devra la retourner dans les quatre jours au Secrétariat, avec son manuscrit. Les « corrections d'auteurs » (modifications ou additions de texte) trop nombreuses, et non justifiées par une information de dernière heure, pourront être facturées aux auteurs.

Ceux-ci recevront gratuitement 50 exemplaires imprimés de leur travail. Ils pourront obtenir à leur frais des fascicules supplémentaires en s'adressant à la Bibliothèque centrale du Muséum : 38, rue Geoffroy-Saint-Hilaire, 75005 Paris.



MUSEUM
NATIONAL
D'HIST.NAT.